基于分形原理的红层软岩崩解特性试验研究

杨峰峰[1],张巨峰[1,2],郑超[1],许泰[1]

(1. 陇东学院能源工程学院,745000 庆阳;2. 湖南科技大学资源环境与安全工程学院,411201 湘潭)

摘　要:在模拟自然界降雨条件下对湘中地区的红层软岩进行了室内干湿循环下的崩解试验,推导了基于体积与粒径关联的分形维数计算方法,分析了随着干湿循环次数增大时红层软岩崩解物各粒组累计百分含量与各粒组含量的变化规律,研究了不同块度质量对崩解的影响,建立了循环次数与分形维数的数学关系。结果表明:当循环次数增大时,累计百分含量与粒径关系曲线明显向粒径较小的方向移动,且相邻曲线间的间距持续缩小,最终间距趋近于零,体现了软岩崩解速率不断减小且最终几乎不变的规律;大于 5 mm ~ 10 mm 粒组大颗粒的含量不断减少,而小于 5 mm ~ 10 mm 粒组小颗粒的含量不断增加;试块质量不同试样的分形维数先快速增加,直至第 4 次循环后,曲线增长速率明显减小,并逐渐趋于稳定。试块质量越大,其崩解后的分形维数也越大,这说明试块质量的大小与其崩解速率成正相关。建立了干湿循环次数与分形维数的数学关系,分析了数学关系的工程意义。

关键词:崩解;红层软岩;淋雨;分形维数;干湿循环

中图分类号:TU458　　　　**文献标志码:**A

Experimental study on disintegration characteristics of red bed soft rock based on fractal principle

YANG Fengfeng[1],ZHANG Jufeng[1,2],ZHENG Chao[1],XU Tai[1]

(1. School of Energy Engineering, Longdong University, 745000 Qingyang, China;2. School of Resource Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, 411201 Xiangtan, China)

Abstract: In this paper, the disintegration test of red bed soft rock in central Hunan under the condition of simulated natural rainfall is carried out under the indoor dry wet cycle. The fractal dimension calculation method based on the correlation between volume and particle size is derived. The changes in cumulative percentage and the percentage of each particle group of disintegration are analyzed with the change of cycle times. The disintegration of red bed soft rock by different block sizes is studied. The mathematical relationship between the number of cycles and the fractal dimension is established. The results show that with the increase of the number of cycles, the curve of the relationship between the cumulative percentage and the particle size of soft rock gradually moves towards the direction of smaller particle size, and the gap

收稿日期:2020-04-21　　　　**修回日期:**2021-11-23

基金项目:甘肃省高等学校创新基金项目(No. 2021B-278);甘肃省青年科技基金计划(No. 20JR10RA140);庆阳市科技计划项目(No. QY2021A-F025;No. QY2021A-F026)

通信作者:杨峰峰,副教授。E-mail:2356059065@qq.com

引用格式:杨峰峰,张巨峰,郑超,等. 基于分形原理的红层软岩崩解特性试验研究[J]. 应用力学学报,2022,39(2):350-355.

YANG Fengfeng,ZHANG Jufeng,ZHENG Chao,et al. Experimental study on disintegration characteristics of red bed soft rock based on fractal principle[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(2):350-355.

between the curves decreases continuously, and finally basically coincides, reflecting that the disintegrated rate of soft rock gradually decreases and finally tends to be stable. The content of large particles with the particle group larger than 5 – 10 mm decreases constantly, while the content of small particles with the particle group smaller than 5 – 10 mm increases constantly. The fractal dimension with different masses of red bed soft rock increases rapidly at first, then slows down after the fourth cycle, and gradually reaches stability. With the increase of the sample mass, the fractal dimension of the sample increases gradually, indicating that the larger the sample mass is, the faster the disintegration rate will be.

Key words: disintegration; red-bed soft rock; rain; fractal dimension; dry and wet cycle

红层软岩又称为红砂岩,是指在中生代、新生代沉积而成的,由于具有较多铁质氧化物而呈现出深红色或褐色的砂岩、泥岩与砾岩[1]。红层软岩在我国分布广泛,其遇水敏感,容易引起工程灾害而被归为致灾地层[2]。

目前,对于岩石崩解模型的成果大多在研究崩解物粒径分布的基础上,采用统计学等相关理论建立[3]。文献[4-10]根据软岩崩解后颗粒的粒径分布特征,研究了其崩解后崩解物质量与尺寸之间的分形关系。文献[11]提出采用标准基础熵表征膨胀岩的崩解特性。文献[12-13]通过能量耗散的角度研究了软岩的崩解。文献[3]通过建立软岩崩解的界面模型来表征软岩的崩解过程。文献[1]研究了两类软岩崩解颗粒的粒径分布特征,指出选取粒径大于 5 mm 和小于 0.25 mm 颗粒的变化情况反映岩样崩解的快慢与强弱。水对岩石影响的研究一直以来都是岩土工程领域的研究热点[14]。文献[14]研究了含水状态对砂岩劈裂抗拉性能的影响。文献[15]研究了含水岩体的非线性蠕变损伤。

在已有成果中,考虑软岩试块质量对其崩解影响的文献较少,再者,通过质量与尺寸之间分形关系的研究较为常见。因此,本研究在室内构建淋雨设备,以此来模拟大气环境中的实际降雨过程,把取自湘中地区的软岩样品制备成 5 种不同质量的试块,进行模拟自然界干湿交替下的崩解试验;然后对红层软岩崩解之后崩解物分形维数的变化、崩解物各粒组累计百分含量与各粒组含量的变化情况以及不同质量对红层软岩崩解的影响进行深入研究。

1 红层软岩崩解的分形理论

1.1 红层软岩崩解后颗粒总体积求解

干湿循环作用下软岩的崩解过程满足分形特征[16]。因此,可根据分形理论建立软岩崩解理论[8]:干湿循环作用下一个粒度为 R 的颗粒总是崩解为其自身粒度 $1/r_i$ 的颗粒 N_i 个,即崩解为粒度 $\{R/r_1, R/r_2, \cdots, R/r_i, \cdots, R/r_n\}$ 的颗粒数量分别为 $\{N_1, N_2, \cdots, N_i, \cdots, N_n\}$ 个。由自相似性原理可知,各软岩颗粒的崩解均按此规律进行,故在第 2 次循环中崩解粒度为 R/r_i 的崩解产物继续崩解为粒度 $\{R/(r_ir_1), R/(r_ir_2), \cdots, R/(r_i^2), \cdots, R/(r_ir_n)\}$ 的颗粒各 $\{N_1, N_2, \cdots, N_i, \cdots, N_n\}$ 个,以后按此规律不断崩解。由质量守恒原理,即崩解前后质量不变,可知,崩解物粒度与颗粒数量满足

$$\frac{N_1}{r_1^3} + \frac{N_2}{r_2^3} + \cdots + \frac{N_i}{r_i^3} + \cdots + \frac{N_n}{r_n^3} = 1 \tag{1}$$

根据文献[5,12-13,17],将软岩崩解后的颗粒假设为球形,且假设软岩崩解过程中的密度均匀不变。结合筛分试验,将软岩崩解后大小接近的部分进行整体分析,若试验中采用了 n 个土工筛的直径,那么可以将红层软岩崩解后的产物分为 $(R_1 - R_2), (R_2 - R_3), \cdots, (R_i - R_{i+1}), \cdots, (R_n - R_{n+1})$ 的粒组,其中 R_i 为第 i 个土工筛对应的直径,使各粒组对应的崩解物颗粒数量分别为 $\{N_1, N_2, \cdots, N_i, \cdots, N_n\}$ 个,然后取各粒组的平均粒径,则 $(R_i - R_{i+1})$ 粒组满足如下公式。

$$m_i = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{x}{2}\right)^3 \rho N_i = V\rho N_i = \rho \sum V_i \tag{2}$$

式中:m_i 为 $(R_i - R_{i+1})$ 粒组的质量,g;x 为 $(R_i - R_{i+1})$ 粒组的平均粒径,cm;ρ 为软岩的干密度,g/cm^3;N_i 为 $(R_i - R_{i+1})$ 粒组的颗粒数量;V 为 $(R_i - R_{i+1})$ 粒组单个颗粒的体积,cm^3;$\sum V_i$ 为 $(R_i - R_{i+1})$ 粒组颗粒的总体积,cm^3。

1.2 基于体积与粒径关联的分形维数求解

文献[18]指出,软岩破碎块度的分形粒子可根据数目分布函数 $Y_n(x)$ 的定义求解,则 x 与 $x + \mathrm{d}x$ 之间的粒子数目 $\mathrm{d}N$ 为

$$dN = N_t dY_n(x) \quad (3)$$

式中：$Y_n(x)$ 为小于 x 的粒子总数/软岩崩解后的总粒子数；N_t 为软岩崩解后的总粒子数。

在 x 与 $x + dx$ 的尺寸区间粒子的体积 dV 可由 dN 乘以单一粒子的体积求得，即

$$dV = k_v x^3 N_t dY_n(x) \quad (4)$$

式中 k_v 为体积形状因子。

dV 亦可直接由体积分布函数 $Y_v(x)$ 求得，即

$$dV = V_t dY_v(x) \quad (5)$$

式中：V_t 为软岩崩解后的粒子总体积；$Y_v(x)$ 为小于粒径 x 的粒子总体积/软岩崩解后的粒子总体积。

由式(4)、式(5)可得

$$Y_v(x) = (k_v/V_t)x^3 N_t dY_n(x) \quad (6)$$

由数目分布函数的基本定义，$Y_n(x)$ 可表述为

$$Y_n(x) = (N_t - N)/N_t \times 100\% = (1 - N/N_t) \times 100\% \quad (7)$$

式中 N 为尺寸大于 x 的粒子数目。

由软岩的崩解满足分形理论可得

$$Y_n(x) \sim -x^{-D_v} \quad (8)$$

$$dY_n(x) \sim x^{-D_v-1} \quad (9)$$

式中 D_v 为基于体积与粒径关联的分形维数。

将式(9)代入式(6)，得

$$dY_v(x) \sim x^{2-D_v} \quad (10)$$

对式(10)进行积分，得

$$Y_v(x) \sim x^{3-D_v} \quad (11)$$

式(11)即为体积分布函数的分形关系式。使 $\alpha = 3 - D_v$，通过式(10)可以看出，D_v 的解即为 $\lg Y_v(x) - \lg(x)$ 直线的斜率 α。本研究结合试样崩解的分形理论与室内筛分数据，采用式(2)得到 $(R_i - R_{i+1})$ 粒组的颗粒总体积，再求得小于 x 的粒子总体积/软岩崩解后的粒子总体积 $Y_v(x)$，采用数据拟合的方法求解 $\lg Y_v(x) - \lg(x)$ 所在直线的斜率 α，最后求取其分形维数的方法进行研究。

2 崩解试验

2.1 红层软岩基本物理力学性质

试验采用的红层软岩取自湖南省湘潭市，现场取样如图 1 所示。对试样进行多组 X 射线衍射试验，分析其矿物成分。图 2 为红层软岩 X 射线衍射结果，分析得出试样的矿物成分如表 1 所示。

严格遵守试验规程，通过室内试验可以得到红层软岩试样抗压强度为 11.12 MPa，天然含水率为 1.43%，干密度为 2.38 g/cm³。

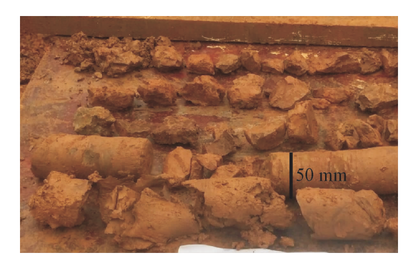


图 1 红层软岩现场取样

Fig. 1 Field sampling of red-bed soft rock

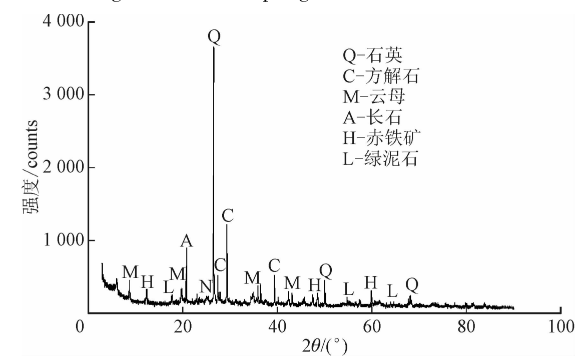


图 2 红层软岩 X 射线衍射结果分析

Fig. 2 X-ray diffraction analysis of red-bed soft rock

表 1 红层软岩的矿物成分

Tab 1 Mineral composition of red-bed soft rock

矿物名称	含量/%
石英	44.26
方解石	23.35
云母	10.23
绿泥石	11.41
长石	5.88
赤铁矿	4.87

2.2 试验方案与试验方法

红层软岩耐崩解试验严格按照岩石试验规范(DL/T 5368—2007)[19]进行。开展 5 组不同试块质量的崩解试验，每组试验包含 10 块试样，每个试块的质量区间为：40 g ~ 60 g、110 g ~ 130 g、370 g ~ 390 g、430 g ~ 450 g、600 g ~ 620 g，每组试样编号为：1#、2#、3#、4#、5#，试验采用的试样从图 1 所示的现场取样中挑选。

本试验通过在室内模拟大气环境降雨的试验条件，试验详细步骤参考水利水电工程岩石试验规程(DL/T 5368—2007)[19]。喷淋设备安置有数个喷头，喷头向上喷水，然后在重力作用下自由落下，这样可以避免水对试样的冲刷，试验过程大于 24 h。试验

干燥温度为 105 ℃ ~110 ℃,干湿循环次数为 30 次。

3 基于分形原理的红层软岩崩解研究

3.1 累计百分含量-粒径分析

按照第 2 章室内崩解试验,开展 30 次干湿循环的崩解试验。考虑篇幅,此处仅给出 5#试样干湿循环 30 次后的效果图,见图 3。以小于某粒径累计百分含量为纵坐标,以粒径为横坐标,绘制不同质量红层软岩崩解物各粒组累计百分含量与循环次数的关系曲线,由于 5 组试样的关系曲线比较相似,此处仅选取其中一组试样的关系曲线进行分析。图 4 所示为 1#试样红层软岩崩解物各粒组累计百分含量与循环次数的关系曲线。

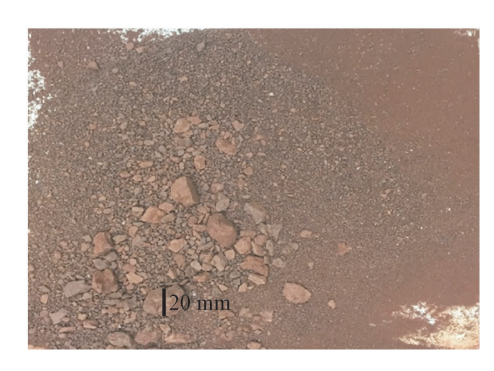


图 3 干湿循环 30 次试样(5#)

Fig. 3 30th dry and wet cycles(5#)

从图 4 中可以看出:随着粒径的减小,累计百分含量与粒径的关系曲线可根据斜率的不同划分成 3 部分,即斜率基本为常数阶段、斜率逐渐增大阶段和斜率迅速增大为无穷大阶段;当循环次数增大时,曲线明显向右(即粒径较小的方向)发生移动,相邻曲线间的间距连续缩小,最终间距趋近于零。这体现了软岩崩解速率不断减小且最终接近于稳定的变化规律。

3.2 各粒组含量分析

为了进一步分析随着干湿循环次数变化时各粒组崩解物的变化情况,绘制干湿循环 2 次、10 次、20 次、30 次时崩解物各粒组百分含量的关系曲线,如图 5 所示。图中横坐标表示的各粒组粒径范围依次为:60 mm ~40 mm、40 mm ~20 mm、20 mm ~10 mm、10 mm ~5 mm、5 mm ~2 mm、2 mm ~1 mm、1 mm ~0. 5 mm、0. 5 mm ~ 0. 25 mm、0. 25 mm ~0. 075 mm。由图 5 可知,随着干湿循环次数的增加,大于 10 mm ~5 mm 粒组大颗粒的含量不断减少,而小于 10 mm ~5 mm 粒组小颗粒的含量不断增加。

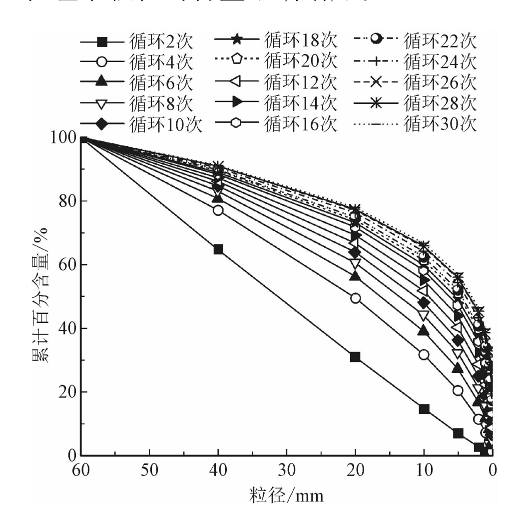


图 4 各粒组累计百分含量与粒径的关系(1#)

Fig. 4 Accumulated percentage versus particle size relationship (1#)

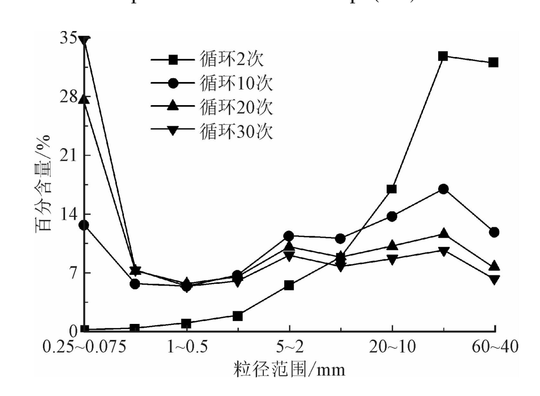


图 5 各粒组百分含量关系曲线(2#)

Fig. 5 Percentage of each particle for the disintegration of red-bed soft rock(2#)

3.3 红层软岩崩解的分形维数研究

依据上述不同块度红层软岩崩解试验结果,采用第 2 章节推导的红层软岩崩解分形理论,求解得到红层软岩崩解的分形维数。以干湿循环次数为横坐标,以求得的分形维数为纵坐标,绘制不同质量红层软岩试样崩解后分形维数与循环次数的曲线,见图 6。由图 6 可知,当循环次数不断增大时,试块质量不同试样的分形维数先快速增加,直至第 4 次循环后,曲线增长速率明显减小,并逐渐趋于稳定。试块质量越大,其崩解后的分形维数也越大,这说明试块质量的大小与其崩解速率成正相关。究其原因,可采用岩块的尺寸效应进行解释。

由上述分析可知,干湿循环次数对红层软岩的

崩解具有较大影响,因此,有必要建立循环次数与崩解指标的数学关系,从函数角度进行研究。红层软岩的干湿循环崩解试验需要花费较长的时间,在工程实践中进行30次干湿循环试验往往难以实现,所以,建立循环次数与崩解指标的数学关系,对于后续建立崩解特性预测模型的研究具有一定的意义。将分形维数与循环次数进行回归分析,可得

$$D = A + (B + C/N_C)\ln(N_C) \tag{12}$$

式中:N_C 为循环次数;A、B、C 均为拟合参数,参数取值见表2。

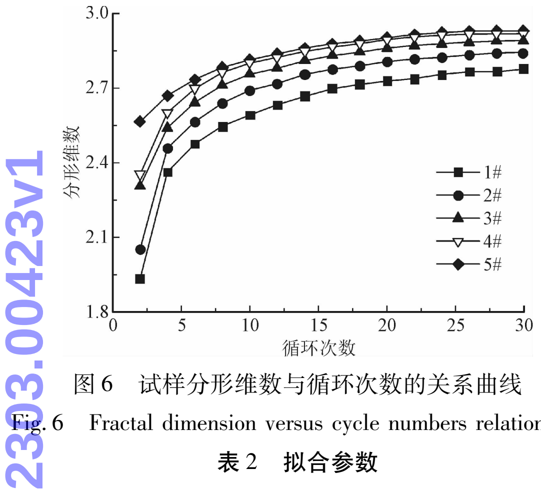


图6 试样分形维数与循环次数的关系曲线

Fig. 6 Fractal dimension versus cycle numbers relationship

表2 拟合参数

Tab. 2 Fitting parameters

Nc	A	B	C	相关系数
1	0.282 8	0.631 9	3.579 4	0.971 7
2	0.460 8	0.603 8	3.466 7	0.965 1
3	1.533 4	0.360 9	1.562 4	0.969 8
4	1.455 5	0.382 0	1.884 2	0.965 3
5	2.401 9	0.156 4	0.182 7	0.988 3

图7为按照式(12)拟合结果与计算结果的对比图。为了避免曲线较多难以观察,图中仅选取1#、3#、5#试样拟合结果与计算结果进行对比。从图7中的曲线和表2中的相关系数可以看出,式(12)适用于描述干湿循环次数与分形维数的关系。软岩在我国分布广泛,常用于公路与铁路的路基填料,但由于其风化快、强度低,所以在进行填筑之前先进行崩解处理,该方法已在广西、云南等地得到应用[20]。由本试验结果可知(如图6所示),不同块度的红层泥岩在干湿循环6次之后,其崩解程度逐渐趋于稳定。因此,在填筑之前,可先对不同块度的红层泥岩进行6次干湿循环预崩解处理,使其崩解达到基本稳定之后再进行填筑,从而增加路基稳定与安全。

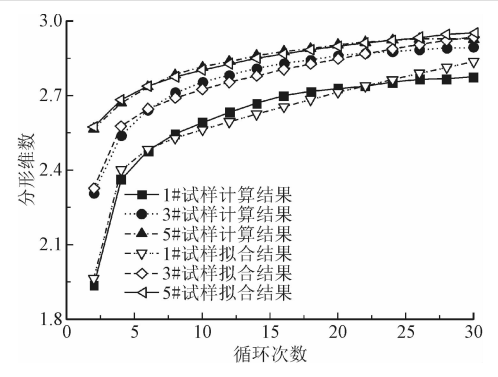


图7 拟合结果与计算结果对比图

Fig. 7 Comparison between fitting results and calculation results

4 结 论

本研究在模拟自然界降雨条件下,对湘中地区的红层软岩进行了干湿循环下的崩解试验,推导了基于体积与粒径关联的分形维数计算方法;分析了随着循环次数增大时,红层软岩试样崩解物各粒组累计百分含量与各粒组含量的变化规律;研究了不同试块质量对红层软岩崩解的影响,建立了循环次数与分形维数的数学关系,得到的主要结论如下。

1)试块质量不同的试样崩解后,其累计百分含量与粒径关系曲线的形状都表现出上凸形;当循环次数增大时,曲线明显向粒径较小的方向移动,且相邻曲线间的间距持续缩小,最终间距趋近于零,体现了软岩崩解速率不断减小且最终几乎不变的规律。

2)当循环次数不断增大时,试块质量不同试样的分形维数先快速增加,直至第4次循环后,曲线增长速率明显减小,并逐渐趋于稳定。试块质量越大,其崩解后的分形维数也越大,这说明试块质量的大小与其崩解速率成正相关,其原因可归结为岩块尺寸效应。

3)建立了干湿循环次数与分形维数的数学关系,分析了数学关系的工程意义。分析表明,不同质量的红层泥岩在干湿循环6次之后,其崩解程度逐渐趋于稳定。

参考文献

[1] 吴道祥,刘宏杰,王国强. 红层软岩崩解性室内试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(增刊2):4173-4179. (WU Daoxiang, LIU Hongjie, WANG Guoqiang. Laboratory experimental study of slaking characteristics of red-bed soft rock[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2010, 29(S2): 4173-4179(in Chinese)).

[2] 邬斌杰,徐光黎,刘维. 三峡库区巴东组红层泥岩崩解和强度弱化特性研究[J]. 安全与环境工程,2020,27(2):50-57.(WU Binjie,XU Guangli,LIU Wei. Disintegration and strengthe weakening charavteristics of red-bed mudstone in badong formation in the Three Gorges reservoir region[J]. Safety and environmental engineering,2020,27(2):50-57(in Chinese)).

[3] 潘艺,刘镇,周翠英. 红层软岩遇水崩解特性试验及其界面模型[J]. 岩土力学,2017,38(11):3231-3239.(PAN Yi,LIU Zhen,ZHOU Cuiying. Experimental study of disintegration characteristics of red-bed soft rock within water and its interface model[J]. Rock and soil mechanics,2017,38(11):3231-3239(in Chinese)).

[4] 张丹,陈安强,刘刚才. 紫色泥岩水热条件下崩解过程的分维特性[J]. 岩土力学,2012,33(5):1341-1346.(ZHANG Dan,CHEN Anqiang,LIU Gangcai. Disintegration characteristics of purple mudstone based on fractal dimension under hydrothermal condition[J]. Rock and soil mechanics,2012,33(5):1341-1346(in Chinese)).

[5] 邓涛,黄明,詹金武. 不同 pH 环境下黏土类岩崩解过程分形演化规律[J]. 同济大学学报(自然科学版),2014,42(10):1480-1485.(DENG Tao,HUANG Ming,ZHAN Jinwu. Fractal evolution law of clay rock disintegration under different pH conditions[J]. Journal of Tongji University(natural science),2014,42(10):1480-1485(in Chinese)).

[6] 赵明华,陈炳初,苏永华. 红层软岩崩解破碎过程的分形分析及数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版),2007,38(2):351-356.(ZHAO Minghua,CHEN Bingchu,SU Yonghua. Fractal analysis and numerical modeling disintegrate process of red-bed soft rock[J]. Journal of Central South University(science and technology),2007,38(2):351-356(in Chinese)).

[7] 刘晓明,赵明华,苏永华,等. 红层软岩崩解性的灰色关联分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2006,33(4):16-20.(LIU Xiaoming,ZHAO Minghua,SU Yonghua,et al. Grey correlation analysis of slake durability of red bed weak rock[J]. Journal of Hunan University(natural sciences),2006,33(4):16-20(in Chinese)).

[8] 刘晓明,赵明华,苏永华. 软岩崩解分形机制的数学模拟[J]. 岩土力学,2008,29(8):2043-2046.(LIU Xiaoming,ZHAO Minghua,SU Yonghua. Mathematical simulation of fractal mechanism for slaking of soft rock[J]. Rock and soil mechanics,2008,29(8):2043-2046(in Chinese)).

[9] 张宗堂,高文华,张志敏,等. 干湿循环作用下膨胀岩的崩解特性及分形特征[J]. 铁道科学与工程学报,2019,16(4):930-937.(ZHANG Zongtang,GAO Wenhua,ZHANG Zhimin,et al. Disintegration characteristics and fractal features of swelling rock during dry-wet cycles[J]. Journal of railway science and engineering,2019,16(4):930-937(in Chinese)).

[10] KINCAL C,KOCA M Y,OZDEN G,et al. Fractal parameter approach on weathering grade determination of Cesme(Izmir,Turkey) tuffs[J]. Bulletin of engineering geology and the environment,2010,69:617-629.

[11] 曾志雄,孔令伟,田海,等. 膨胀岩崩解特性的干湿循环效应与粒度熵表征[J]. 岩土力学,2017,38(7):1983-1989.(ZENG Zhixiong,KONG Lingwei,TIAN Hai,et al. Effect of drying and wetting cycles on disintegration behavior of swelling mudstone and its grading entropy characterization[J]. Rock and soil mechanics,2017,38(7):1983-1989(in Chinese)).

[12] 刘晓明,熊力,刘建华,等. 基于能量耗散原理的红砂岩崩解机制研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2011,42(10):3143-3149.(LIU Xiaoming,XIONG Li,LIU Jianhua,et al. Slacking mechanism of red sandstone based on energy dissipation principle[J]. Journal of Central South University(science and technology),2011,42(10):3143-3149(in Chinese)).

[13] 黄明,詹金武. 酸碱溶液环境中软岩的崩解试验及能量耗散特征研究[J]. 岩土力学,2015,36(9):2607-2623.(HUANG Ming,ZHAN Jinwu. Disintegration tests and energy dissipation characteristics of soft rock in acid and alkali solution[J]. Rock and soil mechanics,2015,36(9):2607-2623(in Chinese)).

[14] 王晨玺杰,邓华锋,王伟,等. 含水状态对砂岩劈裂抗拉力学特性影响研究[J]. 应用力学学报,2018,35(3):655-661.(WANG Chenxijie,DENG Huafeng,WANG Wei,et al. Effects of water content on the mechanical properties of sandstone splitting test[J]. Chinese journal of applied mechanics,2018,35(3):655-661(in Chinese)).

[15] 殷之平,刘晓丰,张君男. 含水岩体非线性蠕变损伤模型及应用[J]. 应用力学学报,2017,34(2):377-383.(YIN Zhiping,LIU Xiaofeng,ZHANG Junnan. Nonlinear creep damage model of water-bearing rock mass and its application[J]. Chinese journal of applied mechanics,2017,34(2):377-383(in Chinese)).

[16] 涂新斌,王思敬,岳中琦. 风化岩石的破碎分形及其工程地质意义[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(4):587-595.(TU Xinbin,WANG Sijing,YUE Zhongqi. Fractal fragmentation of weathered rock and its application in engineering geology[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering,2005,24(4):587-595(in Chinese)).

[17] 熊力. 红层软岩崩解机理研究及工程应用[D]. 长沙:湖南大学,2011.

[18] 谢和平. 分形-岩石力学导论[M]. 北京:科学出版社,1996.

[19] 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院. 水利水电工程岩石试验规程:DL/T 5368—2007[S]. 北京:中国水利水电出版社,2007.

[20] 付宏渊,史振宁,邱祥,等. 炭质泥岩-土分层路堤在浸水条件下的渗流及变形特征试验[J]. 中国公路学报,2017,30(11):1-8.(FU Hongyuan,SHI Zhenning,QIU Xiang,et al. Seepage and deformation test of carbonaceous mudstone-soil layered embankment under water immersion[J]. China journal of highway transportation,2017,30(11):1-8(in Chinese)).

(编辑　李坤璐)